



Handwritten:
HPS
Priority
Ulrich
8-27-01

11017 U.S. PTO
09/841082



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 100 20 228.4
Anmeldetag: 25. April 2000
Anmelder/Inhaber: ABB Research Ltd.,
Zürich/CH
Bezeichnung: Hochspannungsisolationssystem
IPC: H 01 B, H 01 F

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 16. November 2000
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

BEST AVAILABLE COPY

Weihmayr

BESCHREIBUNG**HOCHSPANNUNGSISOLATIONSSYSTEM**

5

TECHNISCHES GEBIET

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Hochspannungsisolationen. Sie betrifft ein Hochspannungs-
isolationssystem zur elektrischen Isolation von Komponenten
mit einer Betriebstemperatur unterhalb Raumtemperatur gemäss
dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 sowie ein Verfahren zu
dessen Herstellung gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruchs
8.

15 **STAND DER TECHNIK**

Für eine Verwendung im Bereich der Energieversorgung mit Systemspannungen bis 550 kV ist für elektrische Bauteile oder Komponenten, welche für einen sinngemässen Einsatz auf eine unterhalb Raumtemperatur liegende Betriebstemperatur angewiesen sind, ein tieftemperaturtaugliches Hochspannungs-
isolationssystem erforderlich. Dafür wird häufig eine Kombination eines Kühlmediums und einer Feststoffisolation eingesetzt. Liegen die vorgesehenen Betriebstemperaturen genügend tief, scheiden chemische Alterungsvorgänge als Degradationsmechanismen für die Feststoffisolation praktisch aus.
Andererseits ergeben sich durch den Unterschied zwischen der Fertigungstemperatur und der Einsatztemperatur thermisch bedingte Spannungen im Isolationsmaterial, was bei häufigem Abkühlen und Aufwärmen zu Schäden wie Rissen oder Delaminationen führen kann. Falls die elektrischen Bauteile oder Komponenten in direktem mechanischem Kontakt zur Feststoffisolati-

on stehen, darf zudem der thermische Ausdehnungskoeffizient der Isolation nicht allzu sehr verschieden sein von demjenigen der Komponente, um Spannungen in Letzterer zu vermeiden.

Von besonderem Interesse sind elektrische Bauteile mit Komponenten auf der Basis von Hochtemperatursupraleitern, beispielsweise Kabel, Transformatoren, Strombegrenzer und dergleichen. Zur Kühlung von Hochtemperatursupraleitern auf Betriebstemperaturen unterhalb 80 K wird bevorzugt flüssiger Stickstoff (LN₂) eingesetzt.

Die verwendeten Feststoffisolationen sollen meist auch eine gewisse mechanische Stabilität aufweisen und als Stütze oder Stabilisator beispielsweise für Komponenten aus einem keramischen Hochtemperatursupraleitermaterial wirken können. Unter diesen Umständen fallen Isolationen aus Polymerfolien oder Kraftpapier ausser Betracht. Mechanisch beanspruchbare Isolationskomponenten werden üblicherweise aus glasfaserverstärkten Faserverbundwerkstoffen hergestellt. Letztere enthalten eine Polymermatrix aus ausgehärtetem Epoxidharz und Glas- oder Kohlefasern als verstärkendem Trägermaterial. Glasfaserhaltige Faserverbundstoffe weisen allerdings bei 77 K eine geringe Teilentladungsfeldstärke (partial discharge inception field) von ≈ 1 kV/mm auf, und selbst unter Verwendung spezieller Vakuum-Druck Imprägnierverfahren zum Vergiessen der Harzmasse lassen sich bestenfalls ≈ 4 kV/mm erzielen. Entsprechend darf die Isolation zur Vermeidung zu grosser Feldstärken eine gewisse Mindestdicke nicht unterschreiten, was Bestrebungen bezüglich einer kompakten Abmessung zuwiderläuft.

Zur Isolierung von Transformatoren finden häufig aus Zellstoff hergestellte Pressplatten Verwendung, welche beispielsweise unter dem Namen „Transformerboard“ verbreitet sind. Diese sind in Dicken ab 0.5 mm bis einigen mm und in lamierter und verklebter Form bis über 100 mm erhältlich. In

der US 3,710,293 ist ein Isolationssystem aus Schichten von Pressplatten und Kraftpapier offenbart, welche mit einem thermoplastischen Harz vergossen sind. Alternativ dazu werden in ölgekühlten Transformatoren mit Öl imprägnierte Feststoffisolationen aus Zellstoffpapier als Barrieren zwischen benachbarten Wicklungslagen eingesetzt. Vorgängig müssen diese durch ein aufwändiges Ausheiz- und Vakuumverfahren getrocknet werden. Dies soll verhindern, dass das Zellulosematerial Wasser an das Öl abgibt und so dessen dielektrischen Eigenschaften herabsetzt.

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Hochspannungsisolationssystem für einen Einsatz bei Temperaturen unterhalb Raumtemperatur mit hoher Teilentladungsfeldstärke zu schaffen, sowie ein Verfahren zu dessen Herstellung anzugeben.

Diese Aufgaben werden durch ein Hochspannungsisolationssystem mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 sowie ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 8 gelöst.

Kern der Erfindung ist es, ein elektrisch isolierendes Kühlmittel in Verbindung mit einer Feststoffisolation in Form eines Verbundmaterials, welches mit Polymerharz imprägnierte Zellstofffasern umfasst, einzusetzen. Die erhöhte Teilentladungsfeldstärke des Polymerverbundes ermöglicht eine kompaktere Abmessung des Hochspannungsisolationssystems und somit auch Kosteneinsparungen.

Gemäss einer ersten bevorzugten Ausführungsform wird als Kühlmittel flüssiger Stickstoff LN_2 eingesetzt. LN_2 ist geeignet zur Kühlung von Hochtemperatursupraleitern auf eine Betriebstemperatur von 77 K oder weniger. Im Bereich zwischen Raum- und Betriebstemperatur ist der mittlere thermische Expansionskoeffizient des Zellstoff-Polymermatrixverbundes mit

demjenigen des Hochtemperatursupraleiters vergleichbar. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, den Zellstoffverbund und den Hochtemperatursupraleiter in direkten und dauerhaften mechanischen Kontakt zu bringen, ohne dass beim Abkühlen oder
5 Aufwärmen durch Spannungen induzierte Schäden befürchtet werden müssen.

Zur mechanischen Stützung der Hochtemperatursupraleiterkeramik durch den Feststoffisolator wird der Zellstoff vorteilhafterweise in Form von Pressplatten eingesetzt. Zur Erreichung von höheren Dicken und weiter verbesserter mechanischer
10 Stabilität können mehrere dünne, einzeln verformbare Platten laminiert werden. Eine Zwischenschicht aus einem geeigneten Gewebe nimmt überschüssiges Polymerharz auf und verhindert die Ausbildung einer Reinharzschicht zwischen den Pressplatten.
15

Das erfindungsgemässe Verfahren zur Herstellung eines tief-temperaturtauglichen Hochspannungsisolationssystems zeichnet sich dadurch aus, dass die Pressplatten in trockenem Zustand verformt werden und anschliessend imprägniert, d.h. mit einem
20 Polymerharz getränkt werden. Indem bei einer Verformung der Pressplatten auf eine Befeuchtung derselben verzichtet wird, wird auch die für die nachfolgende Imprägnierung notwendige, umständliche Trocknung hinfällig. Dadurch besteht auch nicht die Gefahr, dass die verformte Pressplatte sich beim Trocknen
25 ungewollt verzieht.

Gemäss einer weiteren Ausführungsform wird aus den Pressplatten ein zylindrischer Spulenkörper geformt und darauf ein supraleitender Draht aufgewickelt. Anschliessend werden Spulenkörper und Wicklung miteinander mit Polymerharz vergossen,
30 wodurch die Wicklungen auf den Spulenkörper geklebt und mechanisch fixiert werden.

Vorteilhafte Ausführungsformen gehen aus den abhängigen Patentansprüchen hervor.

KURZE BESCHREIBUNG DER FIGUREN

Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen

5 Fig.1a einen Ausschnitt eines Hochspannungsisolationssystems nach der Erfindung,

Fig.1b einen Schnitt durch eine Anordnung mit einem erfindungsgemäss elektrisch isolierten Leiter,

10 Fig.2 eine Spule mit einem Spulenkörper als Teil eines Hochspannungsisolationssystems gemäss einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung.

Die in den Zeichnungen verwendeten Bezugszeichen sind in der Bezugszeichenliste zusammengefasst. Grundsätzlich sind gleiche Teile mit denselben Bezugszeichen versehen.

15

~~WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG~~

20 In Fig.1a ist ein erfindungsgemässes Hochspannungsisolationssystem zusammen mit einem sich auf hohem elektrischem Potential befindlichen Leiter 1 dargestellt. Der Leiter 1 ist Teil eines elektrischen Bauteils, welches zur Entfaltung seiner vorgesehenen Wirkungsweise gekühlt werden muss auf eine Betriebstemperatur, welche unterhalb der Umgebungs- oder Raumtemperatur (20-25°C) liegt. Das Hochspannungsisolationssystem umfasst einen Feststoffisolator 2 und ein fluides, d.h. flüssiges oder gasförmiges Kühlmittel 3. Der Feststoffisolator 2 besteht aus einem Trägergewebe 20 und einer Polymermatrix 21. Die Matrixsysteme sind vorzugsweise dreidimensional vernetzende Duroplaste und basieren beispielsweise auf ausgehärteten Epoxid-, Silizium- oder Polyesterharzen. Erfindungsgemäss 30 umfasst das Trägergewebe 20 Fasern aus Zellstoff (verarbeiteter Zellulose).

In Fig.1b ist eine Anordnung gezeigt mit einem Leiter 1 als Bestandteil einer zu kühlenden elektrischen Komponente, welche über Zuleitungen 4 mit einem nicht dargestellten Stromversorgungsnetz verbunden ist. Der Leiter 1 ist mit einer erfindungsgemässen Feststoffisolation 2 umgeben und in eine Kühlflüssigkeit 3 eingetaucht. Letztere befindet sich in einem thermisch isolierenden Kühlmittelbehälter 5.

Im Stand der Technik werden im Hinblick auf die erzielbaren mechanischen Eigenschaften Glasfasern eingesetzt und mit dem Polymerharz imprägniert. Der Grund für die eingangs erwähnte bescheidene Teilentladungsfeldstärke von weniger als 4 kV/mm von imprägnierten Glasfasern liegt bei der notwendigen Beschichtung der Glasfasern, welche eine vollständige Benetzung der Fasern mit Harz verhindert. Dadurch entstehen mikroskopisch kleine Hohlräume an den Fasern, in welchen Teilentladungen stattfinden, was wiederum zu einer beschleunigten Alterung der Glasfaserisolation führt. Demgegenüber lassen sich mit polymerharz-imprägniertem Zellstoff bei einer Temperatur von 77 K Teilentladungsfeldstärken von bis zu 10 kV/mm erreichen, weil die Zellstofffasern besser imprägnierbar sind und sich keine Hohlräume bilden.

Der Leiter 1 ist beispielsweise ein Hochtemperatursupraleiter, und als solcher Teil eines zur Energieübertragung eingesetzten Bauteils (Übertragungskabel, Transformator oder Strombegrenzer). Die in Fig.1 gezeigte planare Leitergeometrie ist keinesfalls abschliessend, der Leiter 1 kann auch geeignet gekrümmt sein oder in Form eines Drahtes, eventuell in Zusammenarbeit mit einer normalleitenden Matrix, vorliegen. Im Weiteren ist der Einsatz von Substraten oder normalleitenden Bypass-Schichten denkbar. Die kritische Temperatur der bekannten Hochtemperatursupraleitermaterialien liegt oberhalb von 80 K, so dass als Kühlmittel flüssiger Stickstoff LN₂ mit einem Siedepunkt unter Normaldruck von 77 K den Einsatz ebendieser Hochtemperatursupraleiter ermöglicht.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient eines keramischen Supraleiters beträgt typischerweise etwa $10 \cdot 10^{-6}/K$, der Ausdehnungskoeffizient entlang der Ebene eines polymerharzimprägnierten Zellstoffgewebes liegt im Bereich von $6-13 \cdot 10^{-6}/K$.

- 5 Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten unterscheiden sich also so wenig, dass sich bei einer Abkühlung auf Betriebstemperatur der Zellstoffverbund und der Hochtemperatursupraleiter im gleichen Masse zusammenziehen. Sind beide vorgängig bei Umgebungstemperatur beispielsweise durch das genannte Polymerharz zu einem mechanischen Verbund verklebt worden, treten somit keine thermomechanischen Spannungen auf.

- 10 Zellstoff ist unter anderem gepresst in Form von Pressplatten mit einer Dichte von $\approx 1.2 \text{ g/cm}^3$ erhältlich. Auch derartige Platten können mittels geeigneter Verfahren mit Polymerharzen geringer Viskosität imprägniert werden. Dazu müssen die Platten vorgängig ausführlich getrocknet werden. Derartig vergossene Platten können eine Stützfunktion übernehmen und Dank der ähnlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten an sie anschliessende benachbarte Supraleiter stabilisieren.

- 20 Einzelne Platten mit geringer Dicke können in gewissem Umfang verformt werden, wobei dies normalerweise in angefeuchtetem Zustand geschieht. Problematisch ist hierbei, dass beim anschliessenden Trocknungsvorgang die verformte Platte ihre Geometrie wieder ändert, also eine gewisse Formunbeständigkeit auftritt. Bei einer trockenen Verformung ist kein beliebig kleiner Krümmungsradius möglich, für eine Plattendicke von 1 mm ist ein Krümmungsradius erreichbar, welcher im Minimum 15 cm beträgt. Verformte oder plane Einzelplatten können zu Laminaten zusammengefügt und anschliessend imprägniert werden.
- 30

Dazu ist es vorteilhaft, zwischen den Einzelplatten eine Zwischenschicht vorzusehen, da sich sonst überschüssiges Harz als dünne Reinharzschicht mit einer Dicke von $< 50 \mu\text{m}$ zwischen

den Platten ansammelt. Beim Abkühlen führt dies zu einer Neigung zur Delamination des Laminats. Als Material für die Zwischenschicht ist beispielsweise ein Gewebe aus Baumwolle, Aramid- oder Polyethylenfasern geeignet.

- 5 In Fig.2 ist schematisch eine supraleitende Spule mit einem hohlzylinderförmigen Spulenkörper 6 aus einem Komposit mit zwei Schichten 60, 61, welche einzeln zu Rohren geformt wurden und durch eine Zwischenschicht 62 getrennt sind, gezeigt. Auf den Spulenkörper 6 ist ein supraleitender Draht 1' aufgewickelt. Der Innenraum des Spulenkörpers 6 sowie der die Spule umgebende Aussenraum sind mit einem nicht dargestellten Kühlmittel gefüllt. Bei der Herstellung der Spule ist es vorteilhaft, den Imprägnierprozess, d.h. das Vergiessen der Spule erst nach dem Aufwickeln des Drahtes 1' vorzunehmen, weil
10 dadurch der Draht 1' zusätzlich auf dem Spulenkörper 6 fixiert wird.
15

- Da bei Hochspannungskomponenten unweigerlich das Problem einer Feldüberhöhung des elektrischen Feldes bei Kanten, Durchführungen und dergleichen auftritt, ist es vorteilhaft, das
20 Isolationssystem und insbesondere den Feststoffisolator mit gewissen feldsteuernden Eigenschaften zu versehen. Dazu wird ein Material mit einer hohen Dielektrizitätskonstanten, beispielsweise Russ (carbon black), in Pulverform dem Polymerharz zugegeben oder in Gewebeform als Teil der Zwischen-
25 schicht vorgesehen. Dadurch werden dem Komposit halbleitende Eigenschaften verliehen. Ebenso kann eine Aluminiumfolie als Teil der Zwischenschicht zur geometrischen Feldsteuerung eingesetzt werden.

- Sollte eine zusätzliche mechanische Verstärkung gewünscht
30 werden, können weiter Glasfasern eingesetzt werden, wiederum entweder in der Polymermatrix oder als Glasfasermatte in der Zwischenschicht. Dies selbstverständlich nur dort, wo keine

hohen elektrischen Felder auftreten und Teilentladungen zu befürchten sind.

BEZUGSZEICHENLISTE

- | | | |
|----|-------|-----------------------|
| 5 | 1,1' | Leiter, Wicklung |
| | 2 | Feststoffisolator |
| | 20 | Trägergewebe |
| | 21 | Matrix |
| | 3 | Kühlmittel |
| 10 | 4 | Zuleitungen |
| | 5 | Kühlmittelbehälter |
| | 6 | Spulenkörper |
| | 60,61 | Gerollte Pressplatten |
| | 62 | Zwischenschicht |

PATENTANSPRÜCHE

1. Hochspannungsisolationssystem zur elektrischen Isolation
5 von Komponenten mit einer Betriebstemperatur unterhalb Umgebungstemperatur, umfassend ein Kühlmittel (3) sowie einen Feststoff (2) mit einer ausgehärteten Polymermatrix (21) und einem Trägergewebe (20),
dadurch gekennzeichnet, dass das Trägergewebe (20) Zell-
10 stoff umfasst.
2. Hochspannungsisolationssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Kühlmittel (3) flüssigen Stickstoff umfasst und die Komponenten Hochtemperatursupraleitermaterial enthalten.
- 15 3. Hochspannungsisolationssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur mechanischen Stabilisierung der Komponenten das Trägergewebe (20) in Form von Pressplatten vorliegt.
4. Hochspannungsisolationssystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Trägergewebe ein Laminat (6) mit
20 mindestens zwei Schichten (60, 61) aus Pressplatten, welche durch mindestens eine Zwischenschicht (62) getrennt sind, umfasst.
5. Hochspannungsisolationssystem nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Zwischenschicht (62) ein Gewebe aus
25 Baumwolle, Aramid- oder Polyethylenfasern umfasst.
6. Hochspannungsisolationssystem nach Anspruch 1 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass zur Absteuerung elektrischer
Felder Kohlenstoff in Form von Fasern oder Geweben dem
30 Trägergewebe (20) oder der Zwischenschicht (62) beigegeben ist.

7. Hochspannungsisolationssystem nach Anspruch 1 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass zur mechanischen Verstärkung Glasfasern in Form von Fasern oder Geweben dem Trägergewebe (20) oder der Zwischenschicht (62) beigegeben sind.
- 5 8. Verfahren zur Herstellung eines Hochspannungsisolationssystems umfassend ein Kühlmittel (3) sowie einen Feststoff (2) mit einer ausgehärteten Polymermatrix (21) und einem Trägergewebe (20),
dadurch gekennzeichnet, dass ein Zellstoff enthaltendes
10 Trägergewebe (20) als Pressplatte in trockenem Zustand verformt und anschliessend mit einem Polymerharz imprägniert wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass
15 die Pressplatte eine Dicke d und einen minimalen Krümmungsradius R aufweist, und dass ein Verhältnis R/d weniger als 150 beträgt.
10. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass
20 die verformte Pressplatte einen Spulenkörper (6) bildet, auf welchen mindestens eine Wicklung eines supraleitenden Leiters (1') gewickelt wird und anschliessend Spulenkörper (6) und Wicklung (1') zusammen imprägniert werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Erfindung betrifft ein tieftemperaturtaugliches Hochspannungsisolationssystem, welches neben einer
5 Kühlflüssigkeit (3) einen Feststoffisolator (2) auf der Basis eines Zellulosegewebes (20) umfasst. Der Feststoffisolator (2) wird vorzugsweise in Form von Pressplatten eingesetzt und mit einem Polymerharz (21) imprägniert. Er weist bei 77 K ei-
10 ne hohe Teilentladungsfeldstärke auf, zudem ist sein thermischer Ausdehnungskoeffizient optimal auf denjenigen von keramischen Hochtemperatursupraleitern abgestimmt. Die Pressplatten können in trockenem Zustand verformt, insbesondere zu Spulenkörpern, und alternierend mit Baumwollgeweben zu Lami-
15 naten beliebiger Dicke zusammengesetzt werden.

Fig.1

